干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

努尔苏丹樟子松人工林土壤粒度组成特征研究

娄泊远[1,2,3]， 王永东[1,2]， 周 娜[1,2]， 闫晋升[1,2,3]， 艾柯代·艾斯凯尔[1,2,3]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 国家荒漠-绿洲生态建设工程技术研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011；3. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要： 为了揭示努尔苏丹不同林龄樟子松人工林对土壤粒度组成的影响，通过野外采样与室内分析相结合，分析了努尔苏丹周边不同林龄樟子松人工林土壤粒度与分形维数特征，研究了分形维数与土壤特性之间的关系。结果表明：(1) 研究区土壤粒度组成以粉粒为主，砂粒次之，黏粒最少，樟子松人工林的种植能够显著提升土壤表层细颗粒物质含量。不同林龄人工林深层土壤颗粒含量差异不显著。种植樟子松人工林对土壤粒度的影响主要在表层区域。(2) 土壤分形维数变化在2.059~2.569之间，在人工林生长过程中分形维数呈现先增大后减小的趋势，并在种植年限为15 a时达到最大。土壤分形维数与黏粒、粉粒具有正相关性，20 μm粒径是反映研究区人工林土壤分形维数的临界粒径。(3) 研究区土壤分形维数与土壤有机质、全氮含量呈极显著正相关关系，土壤分形维数可以用来评价土壤的养分状况。研究结果可以为努尔苏丹人工林建设和生态恢复提供理论依据。

关 键 词： 土壤；粒度组成；分形维数；理化性质；防护林；努尔苏丹

文章编号：

土壤为植被发育和生长提供必要的物质基础，土壤质地则直接影响着土壤结构、水分、肥力状况及养分转化，对于土壤的蓄水保肥能力以及植物对土壤养分的吸收利用有着重要影响，其变化对干旱区林木的生长和林地生产力具有重要影响[1]。土壤粒度组成与土地利用类型、土地覆被、土壤退化程度等密切相关[2-4]，而且影响着土壤水力特性、肥力状况、抗侵蚀性等[5-7]。土壤粒度组成是表征不同土壤理化性质差异的重要指标，其颗粒的粗细变化直接影响着土壤养分和水分的变化[8-9]。土壤作为由不同颗粒构成的多孔介质，具有一定的分形特征[10]。王国梁等[11]提出土壤颗粒体积分形维数概念，详细合理的阐释了分形维数和土壤粒度组成的关系。分形维数可以作为综合评价土壤状况的指标之一，能够定量描述土壤粒度参数的变化，可反映土壤肥力、土壤结构特性、土壤退化程度等[12]。目前针对人工林对土壤粒度组成的影响已有很多研究，苏敏等[13]研究表明，在呼伦贝尔沙地种植樟子松人工林能够有效增加土壤细颗粒含量；黄刚等[14]研究科尔沁沙地樟子松人工林土壤发现，土壤细颗粒物质的增加来源于樟子松林的降尘截留作用。应用分形维数是评价土壤粒度组成特征的合理方法[15]，热依拉·木民等[16]指出，土壤分形维数与土壤的全氮、有机质、有效磷等显著相关，分形维数可以表征土壤的肥力状况。王贤等[17]研究重庆山区林地土壤分形维数发现，土壤分形维数特征能够用于林地土壤质量评价。目前，关于努尔苏丹地区森林土壤粒度组成及分形特征的研究较少，分析探究当地人工林土壤粒度参数及分形特征，对于评价当地人工林种植对土壤的影响、评估不同生长年限人工林土壤的结构和质量具有重要的意义。

哈萨克斯坦地处欧亚大陆腹地，首都努尔苏丹

收稿日期： 2021-03-11；　**修订日期：** 2021-09-09

基金项目： 中国科学院战略性先导科技专项（A类）(XDA20030102)；中国科学院关键技术人才项目（“一带一路”荒漠化防治技术模式研究）资助

作者简介： 娄泊远（1995-），男，硕士研究生，主要从事水土保持和荒漠化防治相关研究. E-mail: louboyuan18@mails.ucas.ac.cn

通讯作者： 王永东（1978-），男，高级工程师，主要从事荒漠化防治与生态建设研究. E-mail: wangyd@ms.xjb.ac.cn

位于哈萨克斯坦中北部的荒漠草原地带，属于典型的大陆性气候，夏季干燥炎热、降水量少，冬季寒冷漫长、大风天气频繁。恶劣的气候给努尔苏丹居民的生产生活和生态建设带来了极大的不便，困扰着当地的人居环境发展。自1997年起，哈萨克斯坦政府启动了绿环工程，通过20 a的努力，在首都周边营造了6×10^4 hm^2的人工林，为首都的生态环境改善发挥了作用。但当前对于哈萨克斯坦努尔苏丹区域的土壤理化性质的研究仍然较少。对人工林建设过程中土壤粒度的变化不够了解，不利于人工林的后续建设和科学管理。因此，系统全面的获得该区域土壤理化特性，阐明努尔苏丹区域人工林土壤粒度特征，对进一步研究人工林对土壤的影响，以及探究人工林的稳定性和未来可持续发展具有重要意义。本文选取努尔苏丹不同林龄樟子松人工林的土壤作为研究对象，对其土壤粒度特征进行分析，探究其土壤粒度组成和分形维数特征与土壤理化性质的关系，为该地区的土地保护和生态恢复提供参考，为人工林的可持续利用提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于欧亚大陆腹地哈萨克斯坦首都努尔苏丹外围的防护林(50°55′~51°36′N，71°01′~71°57′E)。该研究区为温带大陆性半干旱-干旱气候，属于亚寒带地区，大风及暴风雪天气频繁，有“风都”之称，冬季寒冷漫长，夏季干燥少雨，年降雨量为335 mm。该区域人工林树种丰富，主要造林树种为樟子松(*Pinus sylvestris*)、白桦(*Betula platyphylla*)、梣叶槭(*Acer negundo*)等。研究区造林前为荒漠草原，当地土壤主要为栗钙土，土壤下层存在坚硬紧实的钙积层。

1.2 土壤样品采集

2019年7—9月，在研究区分别选取生境条件相似，林龄为4 a、15 a、49 a的樟子松人工林，并以相同地段的裸地进行对照(表1)。采样时在林内随机选取3个点设置样方挖取剖面，去除土层上枯落物，按0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm共3个深度分层采取3次土壤样品，相同样点同一深度土壤混合后按四分法取约1 kg装入自封袋，并记录样地的经纬度，地形地貌等。采集的样品带回实验室自然风干，去除枯落物、植物根系、砾石等杂物，一部分过2 mm筛用于测定土壤粒度组成，一部分过0.149 mm筛用于测定土壤有机碳、全氮、全磷、全钾含量。

表1 研究样地概况

Tab. 1 Overview of the study sites

样地编号	经纬度	林龄/a	株高/m	胸径/cm
Z1	51°14′17.69″N，71°43′14.50″E	4	1.26±0.27	1.60±0.74
Z2	51°12′03.02″N，71°41′53.49″E	15	5.48±1.30	8.70±2.46
Z3	51°14′15.56″N，71°43′20.49″E	49	16.50±2.63	25.00±6.68
CK	51°09′11.42″N，71°40′04.05″E	–	–	–

注：–表示未有植物生长。

1.3 土壤样品粒度组成及理化指标的测定

使用马尔文激光粒度仪分析土壤样品的粒度组成，其测定范围为0.2~2000 μm。并按照国际制土壤粒径分级方法，将土壤分为砂粒(0.02~2 mm)、粉粒(0.002~0.02 mm)和黏粒(<0.002 mm)。具体测定方法为：称取5 g土样，加入浓度为30%的H_2O_2，低温消煮以去除有机质；冷却后加入浓度为10%的HCl充分搅拌并煮沸，去除样品中的碳酸盐杂质；加入0.5 $mol\cdot L^{-1}$的$(NaPO_3)_6$溶液10 mL，搅拌均匀，放置12 h后待测。使用激光粒度仪测量时充分摇匀样品溶液，迅速加入仪器中[18]，每个样品重复测定3次，并输出颗粒体积分数为5%、16%、25%、50%、75%、84%、95%时所对应的土壤粒径和累计百分含量，用于后续数据计算。

土壤容重采用环刀法测定，有机碳(SOC)采用重铬酸钾容-外加热法测定；全氮(TN)采用高氯酸-硫酸消化法，使用福斯1035全自动定氮仪测定；全磷(TP)采用酸溶-钼锑抗比色法，使用安捷伦CARY60紫外分光光度计测定；全钾(TK)采用酸溶-原子吸收法，使用赛默飞S系列原子吸收光谱仪测定[19]。

1.4 数据分析处理

使用王国梁等[11]提出的公式计算土壤体积分形维数。计算公式如下：

$$\frac{V_{(r<R)}}{V_T}=\left(\frac{R}{\lambda_V}\right)^{3-D} \tag{1}$$

式中：$V_{(r<R)}$为粒径r小于R的颗粒累积体积；R为土壤粒径分级中最大的粒径值；V_T是土壤颗粒的总体积；λ_V是对所有粒级而言的上限值；D是土壤颗粒体积分形维数。

计算时，首先对公式两边取对数，即lg($V_{(r<R)}/V_T$)与(3−D)lg(R/λ_V)，分别以两者为纵、横坐标做出双对数曲线，根据最小二乘法原理利用回归分析可得出直线斜率，即3−D，进而求出分形维数D值[20]。

使用Excel和SPSS软件对数据进行统计分析。应用单因素方差分析(one way ANOWA)检验不同林龄土壤粒度参数及分形维数的之间的显著性差异。不同林分类型间土壤差异用Duncan进行多重比较。运用Pearson相关分析检验土壤分形维数与土壤理化性质的相关性。使用Origin软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同林龄樟子松林土壤粒度组成特征

由不同林龄樟子松人工林土壤粒径分布(图1)可知，0~20 cm土层，研究区土壤主要由粉粒构成，含量为35.64%~62.47%，其次为砂粒，含量为32.05%~61.54%，黏粒含量最少。0~20 cm土层，4 a、15 a、49 a樟子松人工林土壤黏粒含量显著高于对照组裸地，15 a林龄土壤黏粒含量最高，为5.49%，对照组裸地黏粒含量最低，为2.83%；人工林土壤粉粒含量显著高于对照组裸地，其中15 a林龄人工林粉粒含量最高，为62.46%，对照组裸地土壤粉粒含量最低，为35.64%；4 a、15 a、49 a人工林土壤砂粒含量显著低于对照组裸地，土壤砂粒含量最高的为对照组裸地，为61.54%，砂粒含量最低的为15 a林龄樟子松人工林，为35.05%。

20~40 cm土层，不同林龄间的樟子松人工林土壤黏粒、粉粒、砂粒含量差异不显著。40~60 cm土层，15 a林龄樟子松人工林土壤黏粒含量最高，为3.62%，对照组裸地土壤黏粒含量最低，为2.26%，15 a林龄人工林土壤黏粒含量显著高于4 a林龄人工林和裸地土壤。0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm土层，对照组裸地的土壤黏粒、粉粒含量均低于4 a、15 a、49 a樟子松人工林；4 a、15 a、49 a樟子松人工林土壤砂粒含量均低于对照组裸地。

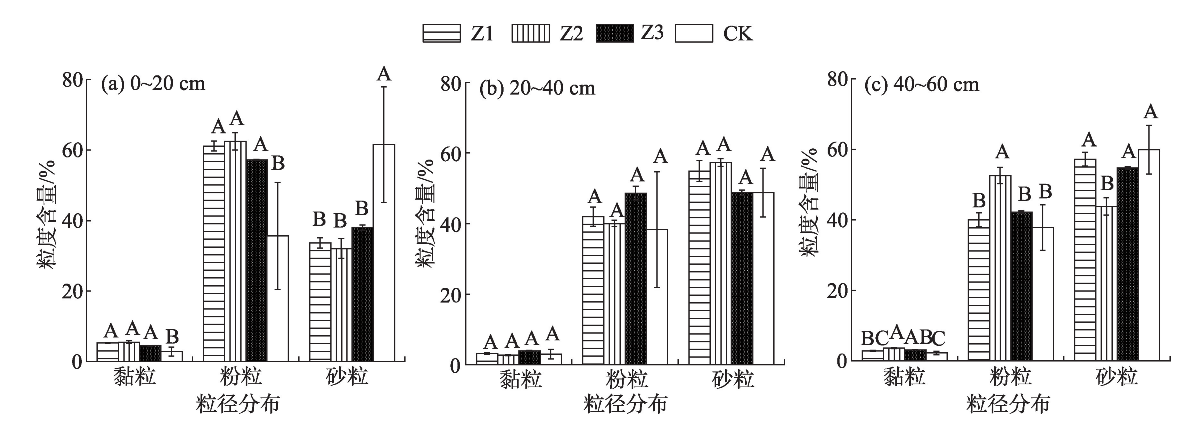
2.2 不同林龄樟子松人工林土壤分形维数特征

研究区土壤分形维数变化范围为2.059~2.569，整体处于较低水平(表2)。土壤分形维数作为反映土壤结构形态的参数之一，土壤质地越粗，砂粒含量越高，分形维数越低[13]。

0~20 cm土层，对照组裸地土壤分形维数显著低于3个不同林龄的樟子松人工林土壤，樟子松人工林的种植能显著改善土壤结构及粒度分布。随着种植年限增加，土壤表层分形维数呈下降趋势，但不显著。20~40 cm土层，各林龄樟子松土壤分形维数差异不显著。40~60 cm土层，15 a樟子松土壤分形维数显著高于对照组裸地，但不同林龄间差异不显著，这可能和土壤母质构成有关。

不同林龄樟子松人工林分形维数在垂直梯度上变化各异。对照组裸地分形维数值在垂直梯度上无明显变化。4 a、15 a人工林土壤分形维数随深度增加而增大，49 a人工林土壤分形维数呈随深度增加而减小，说明不同种植年限的樟子松人工林在垂直梯度上，分形维数变化呈现一定的规律。

对土壤粒度组成与分形维数进行相关性分析(图2)表明，土壤黏粒、粉粒含量与土壤分形维数具有正相关关系，土壤砂粒含量与土壤分形维数具有



注：不同大写字母表示同一深度不同林龄土壤粒度组成差异显著(P<0.05)；Z1、Z2、Z3分别表示4 a、15 a、49 a林龄樟子松林，CK为对照组裸地。

图1 不同林龄樟子松林地土壤粒径分布

Fig. 1 Soil particle size distributions of *Pinus sylvestris* at different ages

表2　各样地不同土壤深度分形维数变化及方差分析

Tab. 2　Soil fractal dimension changes and ANOVA at different soil depths in various sampling sites

土层深度/cm	樟子松人工林林龄			对照组裸地
	4 a	15 a	49 a	
0~20	2.558±0.01A	2.569±0.028A	2.509±0.08A	2.354±0.118B
20~40	2.390±0.02A	2.367±0.007A	2.456±0.07A	2.372±0.131A
40~60	2.379±0.019AB	2.447±0.049A	2.389±0.05AB	2.338±0.062B

注：表中数值表示平均值±标准差；同行不同大写字母表示不同林龄土壤分形维数差异显著(P<0.05)。

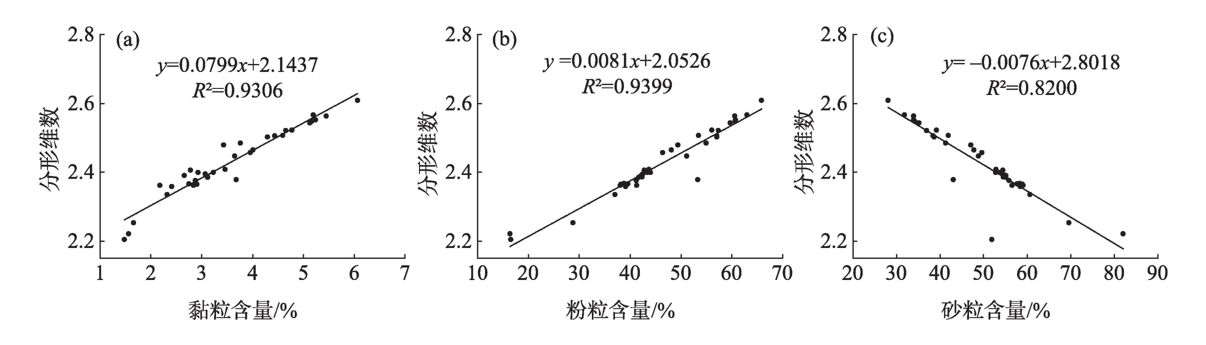


图2　土壤粒度组成与土壤体积分形维数的相关关系

Fig. 2　Correlation between different soil particle composition and fractal dimension of soil volume

负相关关系。这与石占飞等[21]的研究结果一致。由图可知，土壤粉粒含量与分形维数的回归方程决定系数R^2最大，为0.9399，说明研究区土壤粉粒含量对土壤分形维数的影响最大。土壤黏粒含量每增加1%，土壤分形维数增大0.0799，土壤粉粒含量每增加1%，土壤分形维数增大0.0081，土壤砂粒含量每增加1%，土壤分形维数减小0.0076。这说明，20 μm粒径是反映研究区人工林土壤分形维数的临界粒径，<20 μm土壤颗粒的增加和>20 μm土壤颗粒的减少共同影响着土壤分形维数的增大。

2.3 土壤分形维数与土壤理化性质的关系

为进一步分析樟子松人工林土壤分形维数与土壤理化性质的关系，对分形维数与土壤有机质含量、全氮含量、全磷含量、全钾含量、土壤容重进行相关分析，结果如表3所示。研究区土壤分形维数与土壤有机质、全氮含量间呈极显著正相关，与容重间呈极显著负相关，表明分形维数可以表征研究区人工林土壤的部分理化性质，即分形维数越大，土壤有机质、全氮含量越高，而容重含量越低。土壤分形维数与全磷、全钾含量未达到显著水平。

表3　土壤分形维数与土壤性质相关关系

Tab. 3　Correlation between soil fractal dimension and soil properties

土壤指标	分形维数	有机质	全氮	全磷	全钾	容重
分形维数	1					
有机质	0.526**	1				
全氮	0.537**	0.940**	1			
全磷	−0.099	0.156	0.196	1		
全钾	0.237	0.639**	0.738**	0.195	1	
容重	−0.575**	−0.749**	−0.657**	0.021	−0.232	1

注：**表示极显著相关(P<0.01)，样本数N=36。

3 讨论

努尔苏丹生态屏障樟子松人工林表层土壤黏粒和粉粒含量显著高于对照组裸沙地，这是由于防护林的沉积作用所致[22]。努尔苏丹常年大风，黏粒和粉粒因粒径较小、启动风速较小，更易受风的搬运作用影响。随着林龄的增长，人工林林带下方逐渐开始有草本植物生长，植物多样性开始增加，生态系统变得稳定，因此可在一定程度上影响土壤的风蚀[23]。樟子松林带疏透度较低，树木冠层可以有效地降低风速，抑制风力侵蚀[24]，其次植被通过枝叶的拦截作用，降低雨水对地表的冲刷，从而减小了土壤细颗粒的流失。森林通过凋落物与土壤进行物质交换并改变土壤的性质。林地地表凋落物可以增大地表粗糙度，提升土壤颗粒的起风速度，凋落物还能有效增加土壤有机质含量，促进土壤团

聚体的形成，改善土壤结构，提升土壤生态系统稳定性，从而抑制风沙侵蚀。裸沙地表层沙粒组分含量明显高于林地表层，而中层和深层沙粒组分并无明显差异，是由于樟子松人工林冠层可以有效拦截风沙运动，使得细颗粒物质遇阻沉降堆积，导致表层土壤细颗粒物质含量比下层土壤要高[25]。20~40 cm、40~60 cm土层，各林龄樟子松人工林土壤粒度无明显差异，种植樟子松对深层土壤粒度组成无明显改变作用。但也有学者认为，樟子松的根系可以增加土壤养分，改善土壤结构，从而影响粒度组成[26]。由于树木冠层对风沙的截留，以及植物凋落物对土壤的改善，导致樟子松对于土壤的改良是自上而下的，下层土壤的细化过程具有一定的滞后性[22]。

4 a、15 a、49 a林龄樟子松人工林土壤分形维数均显著高于对照组裸地，表明人工林的种植具有改良土壤粒径组成的作用。人工林的种植促进了土壤表层的细化，使土壤分形维数显著增大。樟子松人工林土壤分形维数随着种植年限呈先升高后降低的趋势，49 a人工林土壤分形维数低于4 a、15 a人工林，这可能由于樟子松人工林群落物种单一，长期种植对土壤养分消耗过度，使得一定年限后土壤发生退化。研究区4 a、15 a人工林土壤分形维数在垂直梯度上呈随深度的增加而减小的趋势，这是由于土壤细颗粒物质在垂直梯度的变化主要是通过降水淋溶作用，由土壤大孔隙向下缓慢运移[27]；植物根系的生长发育也会造成土壤颗粒在垂直梯度的变化，但植物根系对土壤的影响作用主要体现在表层。

相关研究表明，土壤分形维数可以较好地反映土壤肥力特征[28]。研究区土壤分形维数与土壤有机质、全氮含量呈极显著正相关关系，种植人工林能够有效提高土壤分形维数，改善当地土壤结构与肥力。同时，从回归分析可以看出，分形维数与土壤黏粒、粉粒含量呈正相关，土壤细颗粒物质含量越高，分形维数越大，土壤养分含量越高。含细颗粒物质较多的土壤对养分的吸附和固定能力强，包含的养分越多[29]。土壤各粒级颗粒对养分的吸附能力不同，细颗粒物质比表面积大，吸附能力强，对土壤养分的吸收和固定更容易，分形维数也更大[30]；土壤表层细颗粒物质的增加，由细粒物质的沉淀和土壤养分的表聚作用综合引起[31]。随着人工林的种植与发育，树木凋落物将养分归还到土壤中，表层土壤有机质养分含量逐渐增加，土壤的分形维数也逐渐增大。因此，可以用土壤分形维数来评价土壤的养分状况。

4 结 论

本研究通过对努尔苏丹不同林龄樟子松人工林土壤粒度组成进行分析，得出以下结论：

（1）努尔苏丹生态屏障樟子松人工林表层土壤主要以粉粒为主，其次为沙粒，黏粒含量最少，樟子松人工林表层土壤黏粒和粉粒含量显著高于裸沙地。20~40 cm、40~60 cm深度土壤主要以砂粒为主，不同林龄人工林深层土壤粒度含量差异不显著。种植樟子松人工林对土壤粒度的影响主要在表层区域。

（2）研究区土壤分形维数变化范围为2.059~2.569，整体处于较低水平，樟子松人工林的种植能显著改善表层土壤结构及粒度分布。土壤黏粒、粉粒含量与土壤分形维数具有正相关关系，20 μm粒径是反映研究区人工林土壤分形维数的临界粒径。

（3）研究区土壤分形维数与土壤有机质、全氮含量呈极显著正相关关系，土壤分形维数可以用来评价土壤的养分状况。在努尔苏丹种植樟子松人工林时，要注意恢复年限的调控，可以考虑与其他植物进行混种以增加群落物种多样性，防止土壤退化。

参考文献（References）

[1] 柳思勉. 干扰强度对会同杉木林内环境特征的影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016. [Liu Simian. Study on the effect of disturbance intensity on environmental characteristics of Chinese fir plantation in Huitong[D]. Changsha: Hunan University, 2016.]

[2] Wang D, Fu B J, Zhao W W, et al. Multifractal characteristics of soil particle size distribution under different land-use types on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2007, 72(1): 29–36.

[3] Hu Y F, Liu J Y, Zhuang D F, et al. Fractal dimension of soil particlesize distribution under different land use/land coverage[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(2): 336–339.

[4] 桂东伟, 雷加强, 曾凡江, 等. 绿洲农田不同深度土壤粒径分布特性及其影响因素——以策勒绿洲为例[J]. 干旱区研究, 2011, 28(4): 622–629. [Gui Dongwei, Lei Jiaqiang, Zeng Fanjiang, et al. Analysis on soil PSD and its affecting factors at different depths in oasis farmland: A case study in the Qira Oasis[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(4): 622–629.]

[5] 王德, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形

分析——以黄土丘陵沟壑区为例[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 3081–3089. [Wang De, Fu Bojie, Chen Liding, et al. Fractal analysis on soil particle size distributions under different land-use types: A case study in the loess hilly areas of the Loess Plateau, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(7): 3081–3089.]

[6] Huang G, Zhang R. Evaluation of soil water retention curve with the pore-solid fractal model[J]. Geoderma, 2005, 127(1–2): 52–61.

[7] Montero E. Rényi dimensions analysis of soil particle-size distributions[J]. Ecological Modelling, 2005, 182(3–4): 305–315.

[8] 袁杰, 曹广超, 鄂崇毅, 等. 环青海湖表层土壤沉积物粒度分布特征及其指示意义[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 150–154. [Yuan Jie, Zeng Guangchao, E Chongyi, et al. Grain size distributions of the surface soil deposit around Qinghai Lake and its implications[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(3): 150–154.]

[9] 闫玉春, 唐海萍, 张新时, 等. 基于土壤粒度分析的草原风蚀特征探讨[J]. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1263–1268. [Yan Yuchun, Tang Haiping, Zhang Xinshi, et al. A probe into grassland wind erosion based on the analysis of soil particle size[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(6): 1263–1268.]

[10] Tyler S W, Wheatcraft S W, et al. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(4): 987–996.

[11] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 545–550. [Wang Guoliang, Zhou Shenglu, Zhao Qiguo. Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(4): 545–550.]

[12] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896–1899. [Yang Peiling, Luo Yuanpei, Shi Yuanchun. Soil fractal characteristics characterized by volumetric weight distribution[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1896–1899.]

[13] 苏敏, 丁国栋, 高广磊, 等. 呼伦贝尔沙地樟子松人工林土壤颗粒多重分形特征[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(11): 129–135. [Su Min, Ding Guodong, Gao Guanglei, et al. Multi-fractal analysis of soil particle size distribution of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in Hulunbeier Sandy Land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(11): 129–135.]

[14] 黄刚, 赵学勇, 苏延桂, 等. 科尔沁沙地樟子松人工林对微环境改良效果的评价[J]. 干旱区研究, 2008, 25(2): 212–218. [Huang Gang, Zhao Xueyong, Su Yangui, et al. Assesment on the effects of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation on microenvironment improvement in the Horqin Sandy Land[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(2): 212–218.]

[15] Chen X, Zhou J. Volume-based soil particle fractal relation with soil erodibility in a small watershed of purple soil[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(4): 1735–1746.

[16] 热依拉·木民, 玉米提·哈力克, 塔依尔江·艾山, 等. 基于分形维数的不同林龄新疆杨对土壤理化特性的影响分析[J]. 土壤通报, 2018, 49(2): 313–319. [Mumin Reyila, Halik Umut, Aishan Tayierjiang, et al. Influence of different aged *Populus alba* var. *pyramidalis* on soil physicochemical properties based on fractal dimension[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(2): 313–319.]

[17] 王贤, 张洪江, 程金花, 等. 重庆四面山几种林地土壤颗粒分形特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 154–159. [Wang Xian, Zhang Hongjiang, Cheng Jinhua, et al. Fractal characteristics and related affecting factors of particle size distribution of different forest soil in Simian Mountains, Chongqing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(3): 154–159.]

[18] 孙梅, 孙楠, 黄运湘, 等. 长期不同施肥红壤粒径分布的多重分形特征[J]. 中国农业科学, 2014, 47(11): 2173–2181. [Sun Mei, Sun Nan, Huang Yunxiang, et al. Multifractal characterization of soil particle size distribution under long-term different fertilizations in upland red soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(11): 2173–2181.]

[19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2008. [Bao Shidan. Study of analysis of soil and agrochemistry[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricuture Press, 2008.]

[20] 贾萌萌, 张忠良, 雷加强, 等. 塔里木沙漠公路防护林地土壤粒径分布的分形特征[J]. 干旱区研究, 2015, 32(4): 674–679. [Jia Mengmeng, Zhang Zhongliang, Lei Jiaqiang, et al. Fractal characteristics of soil particle size distribution in protection forest of Tarim Desert Highway[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(4): 674–679.]

[21] 石占飞, 王力, 王建国. 陕北神木矿区土壤颗粒体积分形特征及意义[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 394–400. [Shi Zhanfei, Wang Li, Wang Jianguo. Volume fractal characteristics and significance of soil particles in the Shenmu Colliery in north Shaanxi Province[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3): 394–400.]

[22] 陈宇轩, 张飞岳, 高广磊, 等. 科尔沁沙地樟子松人工林土壤粒径分布特征[J]. 干旱区地理, 2020, 43(4): 1051–1058. [Chen Yuxuan, Zhang Feiyue, Gao Guanglei, et al. Soil particle size distribution of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in the Horqin Sandy Land[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(4): 1051–1058.]

[23] 贾晓红, 李新荣, 李元寿. 干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征[J]. 地理研究, 2007, 26(3): 518–525. [Jia Xiaohong, Li Xinrong, Li Yuanshou. Fractal dimension of soil particle size distribution during the process of vegetation restoration in arid sand dune area[J]. Geographical Research, 2007, 26(3): 518–525.]

[24] Yu K Y, Yao X, Deng Y b, et al. Effects of stand age on soil respiration in *Pinus massoniana* plantations in the hilly red soil region of southern China[J]. Catena, 2019, 178(5): 313–321.

[25] Hupy J P. Influence of vegetation cover and crust type on wind-blown sediment in a semi-arid climate[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 58(2): 167–179.

[26] 刘昀东, 高广磊, 丁国栋, 等. 风蚀荒漠化地区土壤质量演变研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(5): 161–168. [Liu Yundong, Gao Guanglei, Ding Guodong, et al. Soil quality in wind erosion desertified regions: A review[J]. Journal of Nan-

jing Forestry University (Natural Science Edition), 2017, 41(5): 161–168.]

[27] 曹成有, 蒋德明, 全贵静, 等. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿人工固沙区土壤理化性质的变化[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 108–111, 131. [Cao Chengyou, Jiang Deming, Quan Guijing, et al. Soil physical and chemical characters changes of *Caragana microphylla* plantation for sand fixation in Keerqin Sandy Land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(6): 108–111, 131.]

[28] 刘金福, 洪伟, 吴承祯. 中亚热带几种珍贵树种林分土壤团粒结构的分维特征[J]. 生态学报, 2002, 22(2): 197–205. [Liu Jinfu, Hong Wei, Wu Chengzhen. Fractal features of soil clusters under some precious hardwood stands in the central subtropical region, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(2): 197–205.]

[29] 李毅, 李敏, 曹伟, 等. 农田土壤颗粒尺寸分布分维及颗粒体积分数的空间变异性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 94–102. [Li Yi, Li Min, Cao Wei, et al. Spatial variability of fractal dimension for soil particle size distribution and particle volume percentage in farmlands[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(1): 94–102.]

[30] 肖冬冬, 史正涛, 刘新有, 等. 西双版纳橡胶林土壤颗粒体积分形维数特征[J]. 热带作物学报, 2017, 38(5): 817–823. [Xiao Dongdong, Shi Zhengtao, Liu Xinyou, et al. Fractal dimension of soil particle volume in rubber forest of Xishuangbanna[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2017, 38(5): 817–823.]

[31] 雷泽勇, 于东伟, 周凤艳, 等. 樟子松人工林营建对土壤颗粒组成变化的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(15): 5367–5376. [Lei Zeyong, Yu Dongwei, Zhou Fengyan, et al. Effects of afforestation with *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on change of soil particle size distribution in sandy land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5367–5376.]

Soil particle size composition characteristics of *Pinus sylvestris* plantations in Nur-Sultan City

LOU Boyuan[1,2,3], WANG Yongdong[1,2], ZHOU Na[1,2], YAN Jinsheng[1,2,3], Akida ASKAR[1,2,3]

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China;
2. National Engineering Technology Research Center for Desert-Oasis Ecological Construction, Urumqi 830011, Xinjiang, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Nur-Sultan City is located in northern Kazakhstan, and the local government has planted a large area of plantation forests on the desert steppe around the city. Soil particle size composition is one of the basic physical properties of soil, which affects the changes of soil nutrients and moisture. To explore the effects of different forest ages of *Pinus sylvestris* plantations on soil particle size composition, this study analyzed the characteristics of soil particle size and fractal dimension of plantations around Nur-Sultan City through field sampling and indoor analysis, and examined the relationship between fractal dimension and soil characteristics. Results showed the following: (1) The soil particle size composition in the study area was dominated by silt, followed by sand, and clay was the least. The planting of a *P. sylvestris* plantation could significantly improve the content of fine particles in the soil surface. The deep soil particle content of different forest age plantation was not significant. The effect of planting *P. sylvestris* plantation on soil particle size is mainly observed in the surface area. (2) The variation of soil fractal dimension was between 2.059 and 2.569. During the growth of plantation, the fractal dimension increased first and then decreased, and reached the maximum on the 15th planting year. Soil fractal dimension was positively correlated with clay and silt, and 20 μm was the critical particle size that reflected the fractal dimension of plantation soil in the study area. (3) The soil fractal dimension in the study area was significantly positively correlated with soil organic matter and total nitrogen content, and the soil fractal dimension could be used to evaluate the soil nutrient status. The results can provide a theoretical basis for plantation construction and ecological restoration in Nur-Sultan City.

Key words: soil; particle composition; fractal dimension; physical and chemical properties; protection forest; Nur-Sultan City